

УДК 502.63

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2026.56.279-284>**В.В. Свяцький**, доц., канд. техн. наук, **В.В. Конончук**, доц., канд. техн. наук,**О.Ф. Сіса**, доц., канд. техн. наук, **В.Я. Мірзак**, доц., канд. техн. наук*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна**e-mail: [sviatskyivv@kntu.kr.ua](mailto:sviatskyivv@kntu.kr.ua)*

## Підвищення продуктивності процесу екструзії труб на основі комп'ютерного моделювання

У роботі досліджено вплив конструкції пресового інструмента та схем прямого пресування труб з рухомою і нерухомою голкою на енергосилові параметри процесу. За допомогою комп'ютерного моделювання в програмному комплексі Deform 2D/3D визначено закономірності течії металу, напружено-деформованого стану та обґрунтовано раціональний профіль матричної лійки, який забезпечує зниження зусилля пресування, енергоємності процесу і величину спрацювання пресового інструмента.

**комп'ютерне моделювання, пресування труб, інструмент, матриця, профіль, зусилля, ефективність**

**Постановка проблеми.** Процеси екструзії металів належать до найбільш ефективних методів обробки металів тиском, що забезпечують виготовлення виробів складної форми з високою точністю геометричних розмірів, сприятливим напружено-деформованим станом і покращеним комплексом механічних властивостей. Завдяки можливості досягнення значних ступенів пластичної деформації за один технологічний перехід, високій продуктивності та раціональному використанню матеріалу пресування широко застосовується для виготовлення суцільних і порожнистих профілів з алюмінієвих сплавів, сталей, кольорових металів і спеціальних сплавів. У сучасних умовах розвитку промислового виробництва особливої актуальності набуває підвищення ефективності процесів пресування шляхом зниження енергоємності технологічного процесу, зменшення інтенсивності зношування інструменту, забезпечення високої якості готової продукції та стабілізації технологічних параметрів на всіх етапах деформаційного процесу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Одним із найбільш досліджених напрямів у галузі екструзії металів є вивчення впливу геометричних параметрів одноочкової матриці на напружено-деформований стан металу, силові характеристики процесу та довговічність технологічного інструменту. Аналіз сучасних наукових публікацій свідчить, що саме конструкція робочої зони матриці значною мірою визначає характер плину металу в осередку деформації, розподіл контактних напружень, температурні умови процесу та величину питомої роботи пластичної деформації [1, 3 – 6, 8].

Питання енергоефективності процесів пресування найбільш ґрунтовно представлено в роботі [8], у якій виконано комплексне дослідження енергоспоживання процесу прямої екструзії металів із поєднанням експериментальних досліджень, чисельного моделювання методом скінченних елементів та методів машинного навчання. Такий інтегрований підхід дозволив не лише встановити закономірності зміни енергосилових параметрів залежно від технологічних умов пресування, а й сформулювати прогнозні моделі для оптимізації режимів деформування за допомогою сучасних цифрових технологій, штучного інтелекту та інструментів аналізу даних.

Окремий напрям сучасних досліджень присвячений процесам пресування труб, які характеризуються більш складним напружено-деформованим станом порівняно з пресуванням суцільних профілів. Наявність внутрішньої поверхні виробу, використання голок та необхідність забезпечення рівномірної товщини стінки істотно ускладнюють процес пластичного плину металу. Саме тому оптимізація конструктивних параметрів матриці та голки, а також умов деформування є одним із пріоритетних напрямів розвитку сучасних технологій пресування труб, що активно досліджується із застосуванням методів чисельного моделювання та експериментальної перевірки отриманих результатів [7, 9, 10].

Загалом аналіз наведених публікацій свідчить, що сучасна теорія пресування металів розвивається у напрямі створення комплексних цифрових моделей технологічних процесів, які інтегрують механічні, теплові, трибологічні та енергетичні аспекти пластичного деформування. Використання сучасних методів чисельного моделювання, експериментальної верифікації, цифрових двійників і технологій штучного інтелекту відкриває нові можливості для всебічного аналізу процесів екструзії труб, прогнозування їх перебігу та оптимізації конструктивно-технологічних параметрів інструменту та режимів деформування.

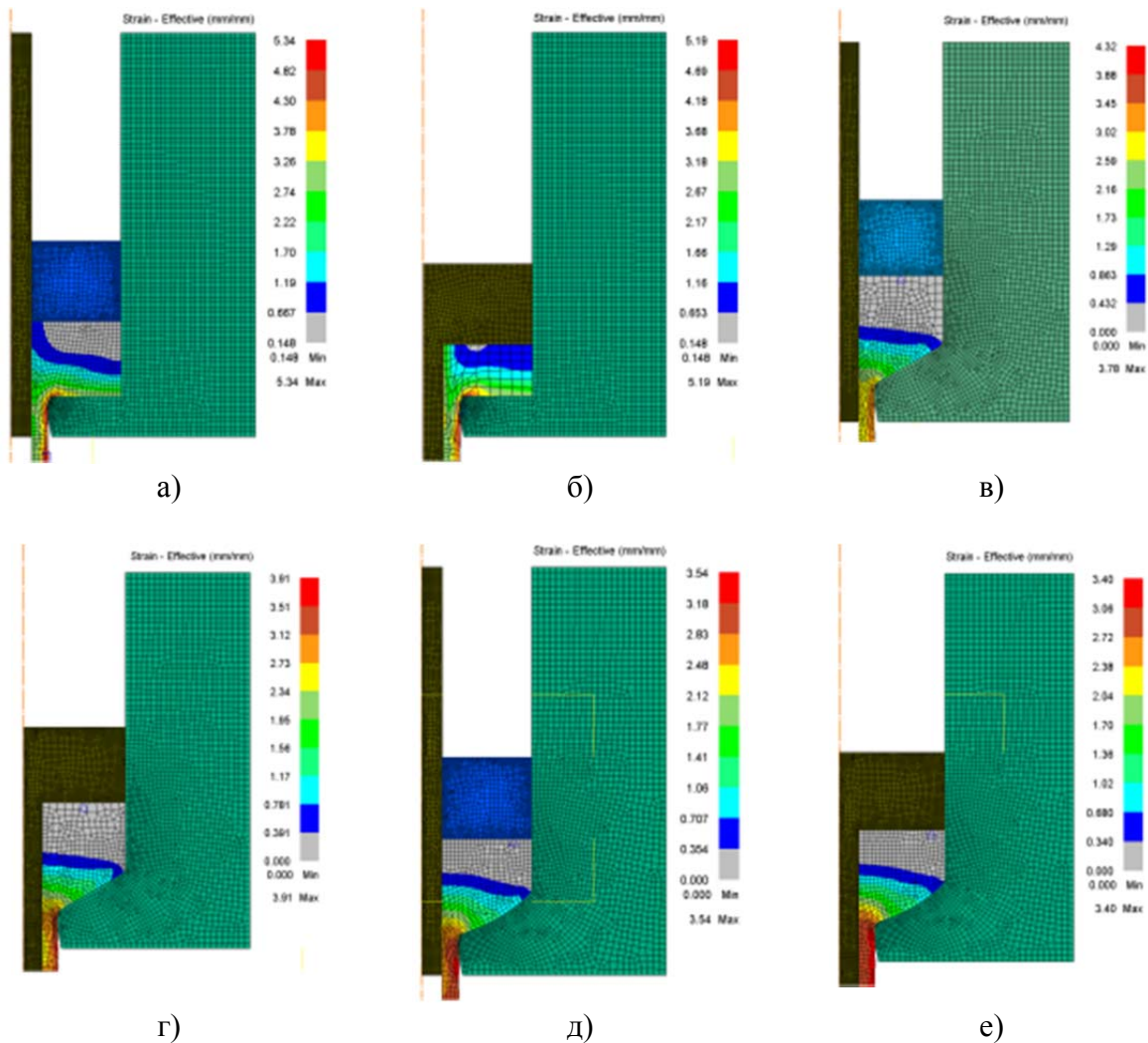
У попередньому дослідженні авторами було виконано комп'ютерне моделювання процесу прямого пресування через матриці з різними профілями матричних лійок із використанням програмного комплексу Deform 2D/3D [11]. Результати дослідження показали, що мінімальні енергосилові параметри процесу досягаються при використанні матриці, профіль лійки якої побудовано за лінією ковзання, що відокремлює пластичну зону деформації від пружної області заготовки в умовах усталеного режиму пресування. Водночас залишається відкритим питання щодо можливості екстраполяції результатів, наведених у роботі [11], на процес прямого пресування труб.

**Постановка завдання.** На основі теоретичних досліджень і комп'ютерного моделювання прямої екструзії труб за допомогою програмного комплексу Deform 2D/3D встановити вплив різних профілів матричних лійок на одержання прес-виробів із найменшими енергосиловими параметрами процесу.

**Виклад основного матеріалу.** Проведене дослідження з визначення профілю матричної лійки на основі аналізу поля ліній ковзання усталеного режиму пресування труб через симетричну одноканальну матрицю з рухомою та нерухомою голкою, що формує внутрішній канал труби.

За допомогою комп'ютерного моделювання за допомогою програмного комплексу Deform 2D/3D прямої екструзії труб з рухомою або нерухомою голкою змащеного зразка зі сплаву AD1 ГОСТ 4784 97, величиною витяжки  $\mu = 13$  та із швидкістю деформації 1 мм/сек досліджувалися такі типи профілів матричних лійок: плоска матриця; матриця, форма якої відповідає усіченому конусу з кутом утворюючої до осі симетрії  $60^\circ$ ; матриця, профіль якої виконаний по лінії ковзання, що відокремлює пластичну зону від пружної усталеного режиму пресування труб. Геометричні параметри увігнутого профілю матричної лійки визначали відповідно до методики, наведеної в роботі [11].

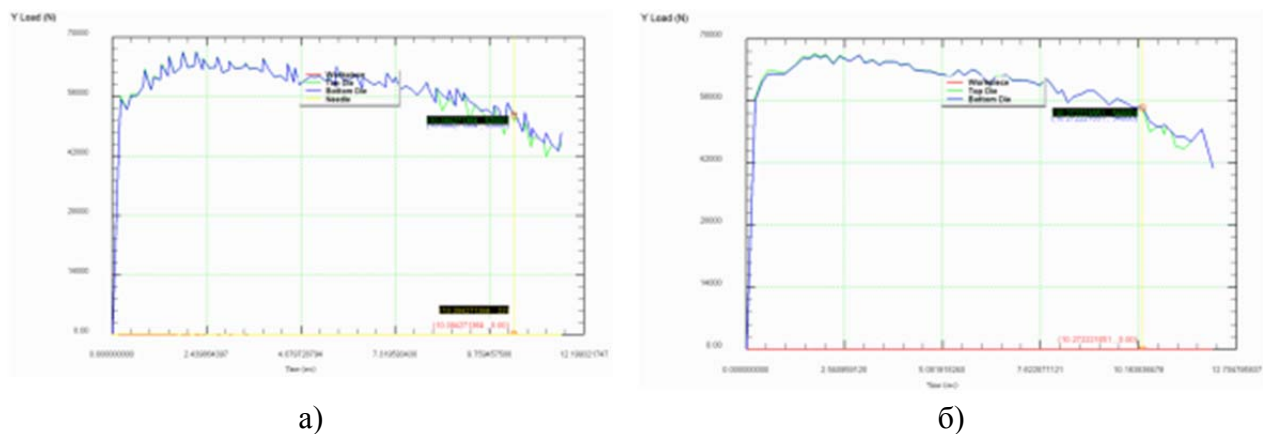
Комп'ютерне моделювання процесу пресування труб за схемами з рухомою та нерухомою голкою, виконане із застосуванням програмного комплексу DEFORM 2D/3D, дало змогу здійснити порівняльний аналіз силових і деформаційних характеристик процесу, а також оцінити інтенсивність спрацювання пресового інструменту за моделлю Рейє-Арчарда-Хрущова [5] з урахуванням профільованої геометрії контактної поверхні матричної лійки.



а – пряма, нерухома голка; б – пряма, рухома голка; в – конусна, нерухома голка; г – конусна, рухома голка;  
 д – увігнута по лінії ковзання, конусна, нерухома голка; е – увігнута по лінії ковзання, конусна, нерухома голка

Рисунок 1 – Розподіл інтенсивностей напружень для усталеного режиму пресування труби через різні типи матричних лійок

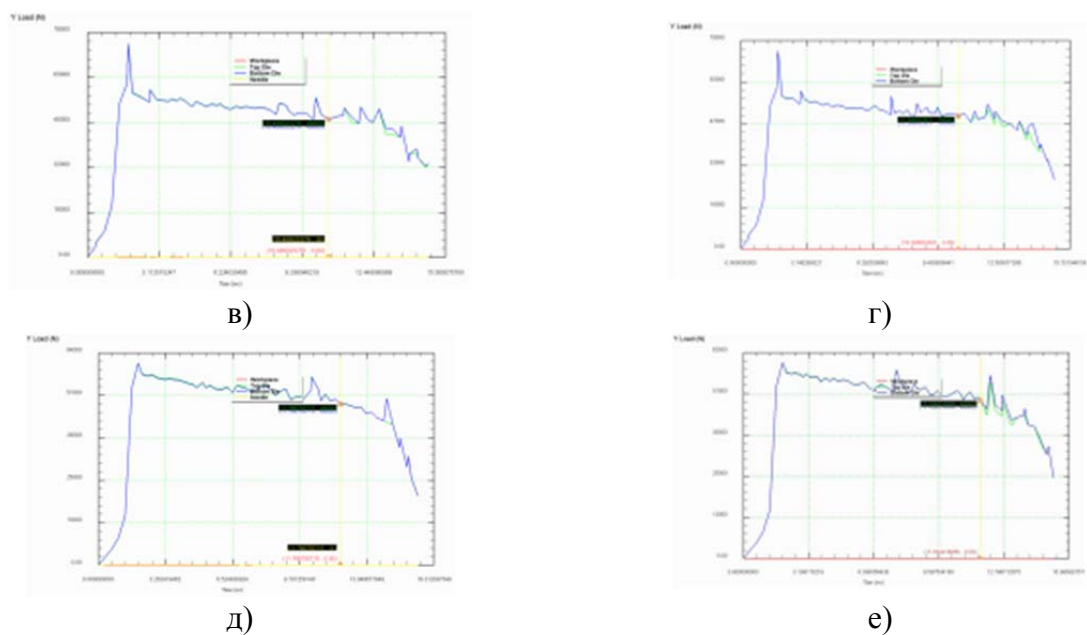
Джерело: розроблено автором



а – пряма, нерухома голка; б – пряма, рухома голка

Рисунок 2 – Графіки зусиль пресування труби через різні типи матричних лійок в залежності від переміщення прес-шайби

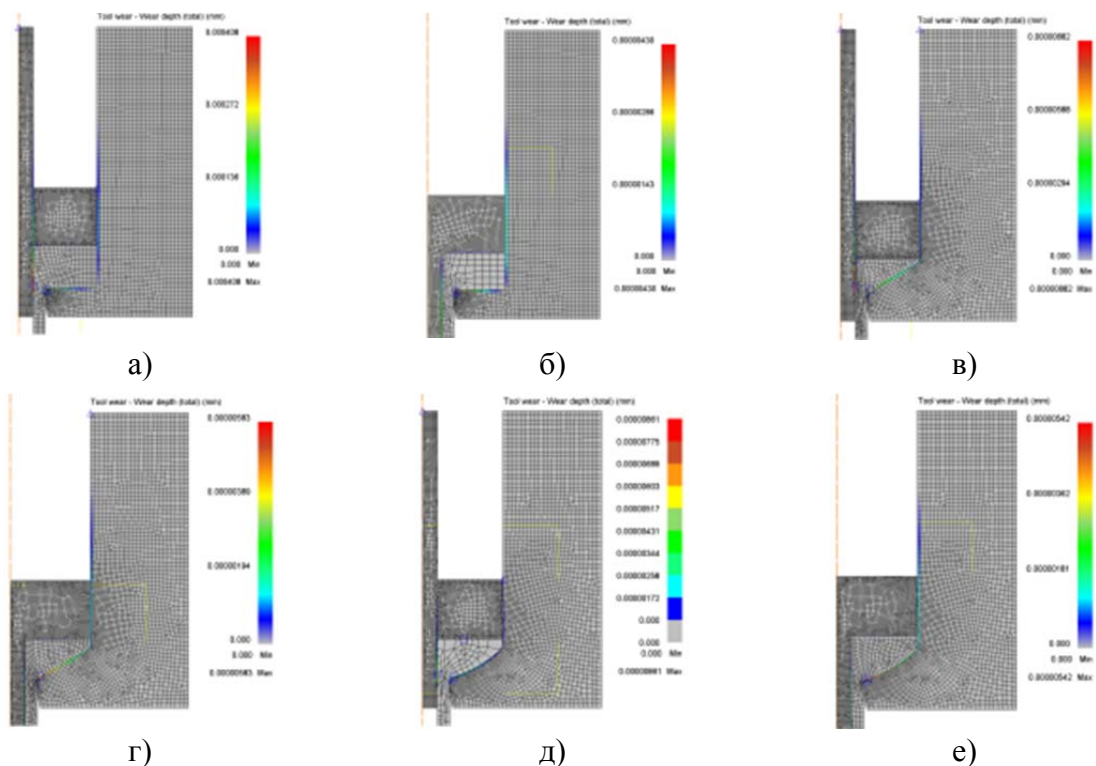
Джерело: розроблено автором



б – конусна, нерухома голка; г – конусна, рухома голка;  
 д – увігнута по лінії ковзання, конусна, нерухома голка; е – увігнута по лінії ковзання, конусна, нерухома голка

Продовження рисунку 2 – Графіки зусиль пресування труби через різні типи матричних лійок  
 в залежності від переміщення прес-шайби

Джерело: розроблено автором



а – пряма, нерухома голка; б – пряма, рухома голка; в – конусна, нерухома голка; г – конусна, рухома голка;  
 д – увігнута по лінії ковзання, конусна, нерухома голка; е – увігнута по лінії ковзання, конусна, нерухома голка

Рисунок 3 – Викривлення координатної сітки для усталеного режиму пресування труби  
 через різні типи матричних лійок

Джерело: розроблено автором

**Висновки.** Результати комп'ютерного моделювання процесу прямої екструзії труб за двома технологічними схемами засвідчили, що увігнута геометрія матричного інструменту, сформована за лінією ковзання, що розмежовує пластичну область деформації та пружну область заготовки в умовах усталеного режиму пресування, забезпечує найбільш сприятливі умови перебігу процесу деформування, сприяє більш рівномірному плину металу в осередку деформації та зменшенню локальних концентрацій напружень. Як наслідок, досягається зниження максимального зусилля пресування, стабілізація силових параметрів технологічного процесу та підвищення його енергоефективності. Для такої профільованої геометрії контактної поверхні матричної лійки характерні мінімальна інтенсивність і найбільш рівномірний характер спрацювання пресового інструменту, визначені відповідно до моделі Рейє-Арчарда-Хрущова, незалежно від застосованої схеми пресування.

Порівняльний аналіз схем екструзії трубних заготовок підтверджує можливість поширення раніше отриманих результатів щодо оптимізації геометрії матричної лійки для суцільних профілів на процес прямого пресування труб та свідчить про універсальність запропонованого підходу до проектування робочих поверхонь пресового інструменту.

## Список літератури

1. I. Nowotyńska, & S. Kut. (2014). Examining the Effect of the Die Angle on Tool Load and Wear in the Extrusion Process. *Journal of Materi Eng and Perform.* 23. 1307–1312. <https://doi.org/10.1007/s11665-014-0872-4>.
2. Jan Spanielka, Milan Skrobán, & Robert Bidulský. (2015). Extrusion of Short Aluminium Billets – Simulation and Semi-Pilot Test. *Acta Metallurgica Slovaca.* 21. 164–170. <https://doi.org/10.12776/ams.v21i2.583>.
3. Kang, B. S., Kim, J., & Kim, J. H. (2002). Finite element simulation of die design for hot extrusion process of Al/Cu clad composite. *Journal of Materials Processing Technology.* 124(1-2). 49–56. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00106-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00106-1).
4. Karayel, D. (2008). Simulation of direct extrusion process and optimal design of technological parameters using FEM and artificial neural network. *Key Engineering Materials.* 367. 185–192. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.367.185>.
5. Kato, K. (2002). Classification of wear mechanisms/models. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology.* 2002. 216(6). 349–355. <https://doi.org/10.1243/135065002762355280>.
6. Lin, C., & Ransing, R. S. (2009). An innovative extrusion die layout design approach for single-hole dies. *Journal of Materials Processing Technology,* 16(1). 78–81. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.07.042>.
7. Malpani, M., & Kumar, S. (2007). A feature based analysis of tube extrusion. *Journal of Materials Processing Technology.* 190(1–3), 363–374. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.02.003>.
8. Miłek, T., Orynycz, O., Matijošius, J., Tucki, K., Kulesza, E., Kozłowski, E., & Wasiak, A. (2025). Research on Energy Management in Forward Extrusion Processes Based on Experiment and Finite Element Method Application. *Materials.* 18(11). 2616. <https://doi.org/10.3390/ma18112616>.
9. М.І. Медведєв, О.С. Бобух, А.В. Красюк, Ю.В. Ниткін, Б.І. Квак. Математичне моделювання процесу пресування труб із використанням пакету QForm. *Теорія і практика металургії.* 2025. 2. 93–106. <https://doi.org/10.15802/tpm.2.2025.13>.
10. Wang, Z., Qi, G., Wang, F., & Zhang, S. (2011). Calculation model of punch force during tube extrusion. *Advanced Materials Research,* 704–705, 273–276. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.704-705.273>.
11. Свяцький В.В., Скрипник О.В., Конончук С.В. Комп'ютерне моделювання процесу прямого пресування через різні профілі матричних лійок. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки.* Кропивницький: ЦНТУ, 2020. 3(34). 3–11. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3\(34\).3-11](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3(34).3-11).

## Referencis

1. I. Nowotyńska, & S. Kut. (2014). Examining the Effect of the Die Angle on Tool Load and Wear in the Extrusion Process. *Journal of Materi Eng and Perform.* 23. 1307–1312. <https://doi.org/10.1007/s11665-014-0872-4>.

2. Jan Spanielka, Milan Skrobán, & Robert Bidulský. (2015). Extrusion of Short Aluminium Billets – Simulation and Semi-Pilot Test. *Acta Metallurgica Slovaca*. 21. 164-170. <https://doi.org/10.12776/ams.v21i2.583>.
3. Kang, B. S., Kim, J., & Kim, J. H. (2002). Finite element simulation of die design for hot extrusion process of Al/Cu clad composite. *Journal of Materials Processing Technology*. 124(1-2). 49-56. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00106-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00106-1).
4. Karayel, D. (2008). Simulation of direct extrusion process and optimal design of technological parameters using FEM and artificial neural network. *Key Engineering Materials*. 367. 185–192. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.367.185>.
5. Kato, K. (2002). Classification of wear mechanisms/models. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2002. 216(6). 349-355. <https://doi.org/10.1243/135065002762355280>.
6. Lin, C., & Ransing, R. S. (2009). An innovative extrusion die layout design approach for single-hole dies. *Journal of Materials Processing Technology*, 16(1). 78-81. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.07.042>.
7. Malpani, M., & Kumar, S. (2007). A feature based analysis of tube extrusion. *Journal of Materials Processing Technology*. 190(1–3), 363–374. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.02.003>.
8. Miłek, T., Orynycz, O., Matijošius, J., Tucki, K., Kulesza, E., Kozłowski, E., & Wasiak, A. (2025). Research on Energy Management in Forward Extrusion Processes Based on Experiment and Finite Element Method Application. *Materials*. 18(11). 2616. <https://doi.org/10.3390/ma18112616>.
9. Medvedev M., Bobukh O., Krasuk A., Nitkin Yu, Kvak B. Matematychni modeliuvannia protsesu presuvannia trub iz vykorystanniam paketu QForm [Mathematical modeling of the pipe pressing process using the QForm package]. *Teoriia i praktyka metalurhii – Theory and Practice of Metallurgy*. 2025. 2. 93-106. <https://doi.org/10.15802/tpm.2.2025.13> [in Ukrainian].
10. Wang, Z., Qi, G., Wang, F., & Zhang, S. (2011). Calculation model of punch force during tube extrusion. *Advanced Materials Research*, 704-705, 273-276. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.704-705.273>.
11. Sviatskyi V., Skrypnyk O., & Kononchuk S. Kompiuterne modeliuvannia protsesu priamoho presuvannia cherez rizni profili matrychnykh liok [Computer Simulation of the Direct Pressing Process Through Various Matrix Funnel Profile]. *Tsentralkoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. 2020. 3(34). 3-11. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3\(34\).3-11](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3(34).3-11) [in Ukrainian].

**Volodymyr Sviatskyi**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Serhii Kononchuk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleh Sisa**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Volodymyr Mirzak**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.  
*Central Ukrainian National Technical University,*

### **Improving the Productivity of the Pipe Extrusion Process Based on Computer Modeling**

The paper presents the results of the study of the method of direct pressing of pipes using a moving and fixed needle in order to determine the rational design of the pressing tool, which ensures increased efficiency of the technological process.

The analysis of the influence of the geometry of the matrix funnel on the nature of the metal flow, the stress-strain state, the energy-power characteristics and the conditions for forming pipe blanks was carried out. To compare different pressing schemes, computer modeling was used in the Deform 2D/3D software package, which made it possible to study the process of pressing the aluminum alloy AD1 through flat, conical and curved (concave) profiles of the matrices. It was established that the shape of the matrix funnel significantly affects the magnitude of the maximum pressing force, the uniformity of the plastic flow of the metal, the distribution of contact stresses and the intensity of the deformation tool. The most effective were the dies with a profile formed along the sliding line, which separates the deformation zone from the "dead" zone, which leads to minimal energy consumption, a more favorable distribution of deformations and increased process stability compared to pressing pipes through traditional flat and conical dies. The tool wear was also evaluated using the Reyer-Archard-Khrushchev model, which made it possible to determine the influence of contact conditions on the durability of the press tool. The results obtained confirm the feasibility of using profiled die funnels during direct pressing of pipes and can be used to optimize the design of the press tool, reduce the energy intensity of the process, increase the resource of technological equipment and ensure stable production of pipes of a given assortment.

**computer modeling, pipe pressing, tool, die, profile, effort, efficiency**

*Одержано (Received) 17.06.2026*

*Прорецензовано (Reviewed) 24.06.2026*

*Прийнято до друку (Approved) 26.06.2026*